

Tomasz Mokros\*

## OCENA ADEKWATNOŚCI MODELI SYMULACYJNYCH

### Wstęp

Podstawowym zagadnieniem podczas prowadzenia eksperymentów symulacyjnych jest odniesienie przyjętego modelu i otrzymanych na nim wyników do symulowanego fragmentu rzeczywistości. Całokształt pojawiających się tutaj problemów określa się jako ocenę zasadności bądź ocenę adekwatności modeli symulacyjnych. Etap ten rozstrzyga, w jakim stopniu można przenieść wnioski dotyczące modelu na badany system, czyli w jakim stopniu model jest adekwatny w stosunku do modelowanej rzeczywistości. Problem ten należy do ważnych, a jednocześnie trudnych zagadnień związanych z symulacją komputerową. Każdy model, niezależnie od swego charakteru, stanowi pewną abstrakcję wybranych aspektów badanego procesu i jest konstruowany w celu wzbogacenia wiedzy dotyczącej rzeczywistości. Eksperyment z modelem jest więc zawsze pośrednią techniką badawczą, stosowaną we wszystkich tych przypadkach, w których poznawanie rzeczywistości metodami bezpośrednimi okazuje się z różnych względów niemożliwe lub niedopuszczalne. Obecność fazy pośredniej – modelu dzieli proces poznawania rzeczywistości na kilka etapów. Najpierw musi nastąpić identyfikacja badanego obiektu. Mając te informacje można sporządzić model matematyczny symulowanego systemu. Teraz można zapisać model w postaci programu na EMC. W kolejnym kroku model poddajemy analizie w celu wykrycia prawidłowości rządzących jego zachowaniem. Ostatni etap ma za zadanie ocenę wiarygodności wyników oraz sformułowanie wniosków z eksperymentów symulacyjnych na modelu.

---

\* Mgr, asystent w Katedrze Informatyki UŁ.

Na etapie oceny zasadności modelu konieczne staje się skonstruowanie narzędzia, pozwalającego na porównanie modelu z odwzorowanym obiektem. W artykule przedstawiono procedurę badania adekwatności modeli symulacyjnych z wykorzystaniem testów statystycznych i analizy widmowej. Procedura ta jest uniwersalna, gdyż uwzględnia podstawowe problemy, z jakimi spotkać się możemy przy ocenie zasadności modelu (tzn. istnienie lub nie autokorelacji między kolejnymi wynikami eksperymentu oraz różna wielkość badanych próbek). Można ją zatem stosować do wszystkich klas modeli symulacyjnych.

Ponieważ w artykule przedstawiono ilościowe metody oceny zasadności modeli symulacyjnych, adekwatność należy rozumieć jako zgodność w sensie statystycznym. Oznacza to, że ocena zasadności procesu symulacyjnego z symulowanym jest dokonana w sensie przyjętego kryterium i testu statystycznego (reguły decyzyjnej). Rozstrzygnięcie testu jest zatem przyjęciem lub odrzuceniem hipotezy o adekwatności modelu.

W szczególnych zastosowaniach technik symulacyjnych, ze względu na brak danych empirycznych, wiarygodność modelu nie może być badana za pomocą standardowych metod ilościowych. Ocena wyników eksperymentu można wtedy powierzyć grupie osób uznanych za specjalistów w określonej dziedzinie. Ich opinie, poparte wnioskami z analizy i dyskusji, wpływają na poziom wiarygodności wyników eksperymentu. Metody te mają szczególne znaczenie przy rozwiązaniach nowatorskich, gdy w danej klasie problemów trudno jest zastosować sformalizowane, matematyczne procedury badania wiarygodności modelu. Stosuje się tutaj techniki heurystyczne, pobudzające twórcze myślenie.

Treść artykułu składa się z dwóch części. Część pierwsza ("Ocena adekwatności modeli symulacyjnych za pomocą testów statystycznych i analizy widmowej") opisuje proponowaną przez autora procedurę badania oceny zasadności modelu za pomocą testów statystycznych i analizy widmowej. Część druga ("Opis algorytmów programowych realizujących ocenę adekwatności modeli symulacyjnych") prezentuje algorytmy programowe obsługujące testy statystyczne i analizę widmową.

# 1. Ocena adekwatności modeli symulacyjnych za pomocą testów statystycznych i analizy widmowej

## 1.1. Przyczyny występowania nieadekwatności modeli symulacyjnych

Podczas przeprowadzania eksperymentów symulacyjnych w trakcie sformułowania modelu, wyboru parametrów i ich estymacji oraz generowania zmiennych losowych pojawia się szereg problemów, które mogą w konsekwencji prowadzić do nieadekwatności modelu symulacyjnego. Do najważniejszych z nich można zaliczyć [2]:

- błędne sformułowanie modelu,
- niewłaściwe przybliżenie zmiennej losowej za pomocą metod generowania,
- błędne sformułowanie parametrów wyjściowych,
- niewłaściwy wybór szacowanych parametrów,
- niewłaściwa metoda estymacji,
- wpływ warunków początkowych na dane,
- wpływ warunków końcowych na dane,
- błędy w gromadzeniu danych.

Lista problemów mogących prowadzić do nieadekwatności modeli symulacyjnych, przedstawionych wyżej, znacznie przekracza nasze możliwości zwalczania źródeł ich powstawania. Nie należy zapominać jeszcze o błędach powstałych w trakcie pisania programu obliczeniowego i błędach rachunkowych. W tym przypadku sumienny badacz powinien wykonać dwie czynności [2]. Po pierwsze, powinien tak zaprojektować eksperyment symulacyjny, aby zmniejszyć potencjalną możliwość wystąpienia kilku z wyżej wymienionych problemów. Po drugie prowadzący badanie powinien zbadać wpływ warunków symulacji na wyniki eksperymentu (uwaga ta dotyczy przede wszystkim problemów wpływu warunków początkowych i końcowych na dane). Wyniki powinny również zostać przeanalizowane w taki sposób, aby można było wykryć wpływ losowych błędów oraz wytyczyć granice, w ramach których otrzymane rezultaty mogą się zmieniać. W tym przypadku informacji na temat reprezentatywności oszacowań parametrów z próbki dostarczają przedziały ufności dla parametrów populacji generalnej. Badając wpływ warunków symulacji oraz analizując wyznaczone przedziały ufności otrzymujemy pewne informacje natury jakościowej. Nie zwalnia

to nas jednak od przedsięwzięcia działań zapobiegających powstaniu błędów.

### 1.2. Opis stosowanej procedury badania adekwatności

Przedstawiona przez autora procedura badania adekwatności modeli symulacyjnych jest całkowicie oryginalna. Została ona opracowana w ramach problemu badawczego KRP XI nt. "Narzędzia zarządzania gospodarką" na Wydziale Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego [6]. W literaturze [2, 5, 7] można się spotkać z różnymi ilościowymi metodami badania zasadności modeli symulacyjnych, są one jednak wycinkowe i nie obejmują całości zagadnienia w danej klasie modeli symulacyjnych. Opisaną przez autora procedura jest uniwersalna, gdyż uwzględnia wszystkie problemy, z jakimi spotkać się możemy przy ocenie zasadności modelu symulującego procesy dyskretne o charakterze losowym (tzn. istnienie lub nie autokorelacji między kolejnymi wynikami eksperymentu oraz różna wielkość badanych próbek). Można ją więc stosować do wszystkich klas modeli symulacyjnych systemów masowej obsługi.

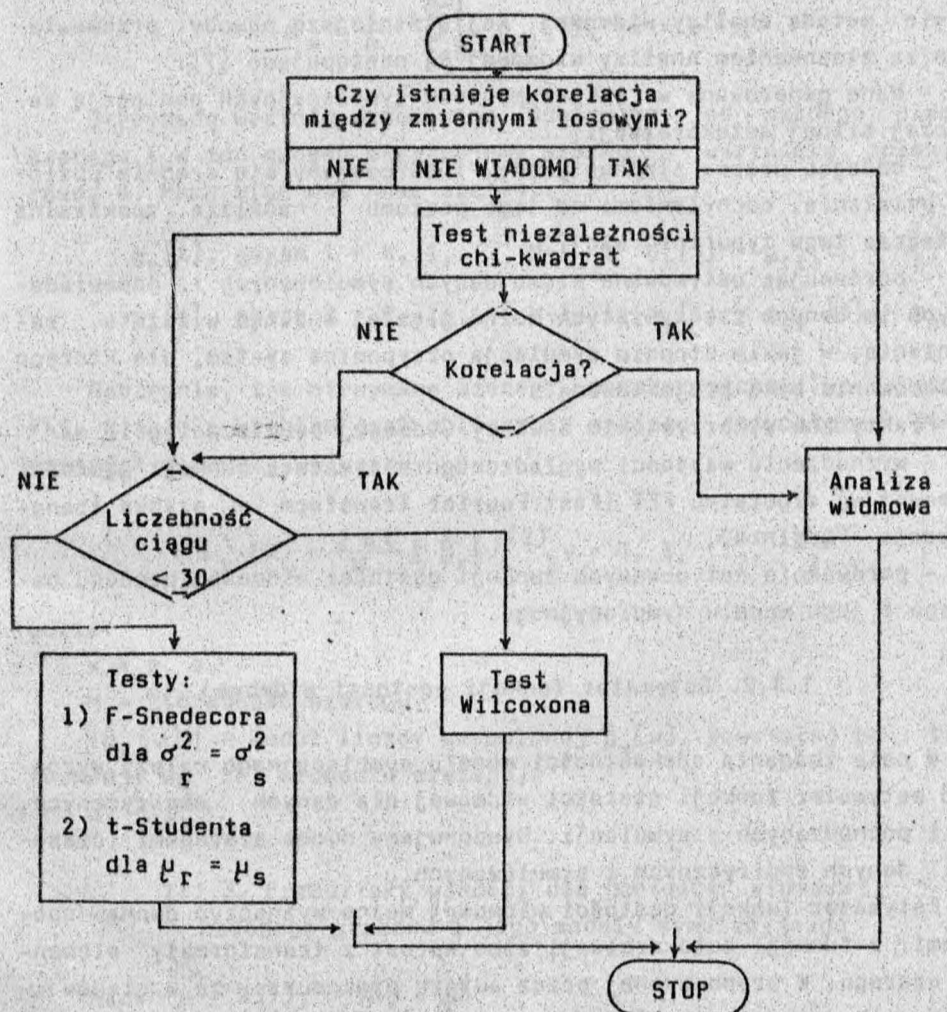
Ocena wiarygodności wyników symulacji polega na ich porównaniu za pomocą testów statystycznych z przebiegami zarejestrowanymi w rzeczywistości. Przyjęcie lub odrzucenie hipotezy o adekwatności modelu jest rozstrzygnięciem testu.

Załóżmy, że w wyniku zgromadzenia danych o rzeczywistym zachowaniu się systemu oraz eksperymentu symulacyjnego uzyskano dwa ciągi losowe. Początkiem całej procedury oceny adekwatności jest sprawdzenie istnienia autokorelacji między kolejnymi wynikami eksperymentu. O tym, czy istnieje korelacja między zmiennymi losowymi możemy rozstrzygnąć na podstawie znajomości przebiegu modelowanego procesu. Jeżeli jednak nie jesteśmy w stanie tego stwierdzić w sposób niesformalizowany, to stosujemy test niezależności chi-kwadrat.

Jeżeli nie występuje autokorelacja lub korelacja wzajemna procesów składowych, to oceny adekwatności dokonujemy za pomocą testów statystycznych parametrycznych (t-Studenta i F-Snedocora - dla dwóch wartości oczekiwanych i dwóch wariancji) lub nieparametrycznych (test Wilcozona) w zależności od przyjęcia czy odrzucenia założenia o normalnym rozkładzie zmiennych losowych. W praktyce kryterium tym

jest liczebność ciągów, gdyż przy liczebności większej od 30 elementów rozkład nieskorelowany może być przybliżony przez rozkład normalny.

W przypadku istnienia korelacji, adekwatność modelu może być określona efektywnie metodą analizy widmowej. Przebieg całego postępowania został przedstawiony w postaci schematu blokowego na rys. 1.



Rys. 1. Schemat badania adekwatności modelu symulacyjnego za pomocą testów statystycznych i analizy widmowej

$\mu_r, \sigma_r^2$  - wartość oczekiwana i wariancja w zbiorowości rzeczywistej;  
 $\mu_s, \sigma_s^2$  - wartość oczekiwana i wariancja w zbiorowości symulowanej

### 1.3. Analiza widmowa

#### 1.3.1. Przyczyny stosowania analizy widmowej do badania adekwatności modeli symulacyjnych

W przypadku istnienia autokorelacji lub korelacji wzajemnej procesów składowych adekwatność modelu może być określona efektywnie metodą analizy widmowej. Najistotniejsze powody przemawiające za stosowaniem analizy widmowej są następujące [7]:

- dane generowane w eksperymentach symulacyjnych podlegają zazwyczaj silnej autokorelacji,
- badając proces stochastyczny, interesujemy się średnim poziomem działania, odchyleniami od tego poziomu - analiza spektralna dostarcza tego typu informacji,
- porównując estymowane widmo danych symulowanych i odpowiadających im danych rzeczywistych można głębiej wniknąć w istotę zagadnienia, w jakim stopniu symulacja przypomina system, dla którego naśladowania była projektowana.

Praktyczne wykorzystanie analizy widmowej będzie polegało na:

- wyznaczeniu wartości wygładzonego estymatora funkcji gęstości widmowej wg algorytmu FFT (Fast Fourier Transform - szybka transformacja Fouriera),
- porównanie estymowanych funkcji gęstości widmowej procesu badanego i jego modelu symulacyjnego.

#### 1.3.2. Estymator funkcji gęstości widmowej

W celu zbadania adekwatności modelu symulacyjnego należy wyznaczyć estymator funkcji gęstości widmowej dla danych empirycznych, jak i pochodzących z symulacji. Dysponujemy dwoma szeregami czasowymi: danych empirycznych i symulowanych.

Estymator funkcji gęstości widmowej można wyznaczyć dwoma sposobami: z funkcji autokorelacji albo wprost z transformaty elementów szeregu. W proponowanej przez autora procedurze, ze względów numerycznych, zastosowano sposób drugi [11].

Mamy dwa szeregi:

$$\begin{array}{ll} g_{r1}[0], \dots, g_{r1}[M-1] & \text{(szereg rzeczywisty),} \\ g_{s1}[0], \dots, g_{s1}[M-1] & \text{(szereg symulowany),} \end{array}$$

gdzie:

$M$  - liczebność ciągów.

Pierwszym krokiem stosowanej procedury obliczeniowej jest wystandardyzowanie obu szeregów, tzn. doprowadzenie do szeregów z wartością oczekiwaną równą 0. Obliczamy więc dla każdego z szeregów wartość oczekiwaną:

$$m_x = \frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} g_{x1}[t], \quad x = r, s \quad (1)$$

Otrzymaną wartość oczekiwaną odejmujemy od każdego elementu szeregu i w ten sposób otrzymujemy szereg z wartością oczekiwaną równą 0. Mamy więc dwa nowe szeregi:

$$g_r[t], \text{ gdzie } t = 0, 1, \dots, M-1 \text{ i } g_r[t] = g_{r1}[t] - m_r,$$

$$g_s[t], \text{ gdzie } t = 0, 1, \dots, M-1 \text{ i } g_s[t] = g_{s1}[t] - m_s.$$

Następnie, tak otrzymane szeregi przekształcamy wg algorytmu FFT. Ostatnim krokiem jest obliczenie wartości estymatora funkcji gęstości widmowej wg wzoru:

$$S_x^*(\nu) = \frac{2 \Delta t}{M} |\hat{g}_x[\nu]|^{(2)}, \nu = 0, 1, \dots, \frac{M+1}{2} \quad (2)$$

gdzie:

$x = r, s$ ,

$M$  - liczebność szeregu,

$|\hat{g}_x[\nu]|$  - moduł liczby zespolonej  $\hat{g}_x[\nu]$ , powstałej po transformacji wg FFT elementu szeregu,

$\Delta t = 1$ .

### 1.3.3. Przedziały ufności dla gęstości widmowej badanego procesu i jego modelu symulacyjnego

Niech  $p = 0.95, 0.90, 0.80$ .

Przedział ufności wyznacza wzór:

$$P \{ A \leq S_x \leq B \} = p. \quad (3)$$

Krańce przedziału ufności wyznaczamy wg wzorów:

$$A = 2 \frac{S_x^*(\nu)}{\chi_{2;1-\alpha/2}^2} \quad (4)$$

$$B = 2 \frac{S_x^*(\nu)}{\chi_{2;\alpha/2}^2} \quad (5)$$

gdzie:

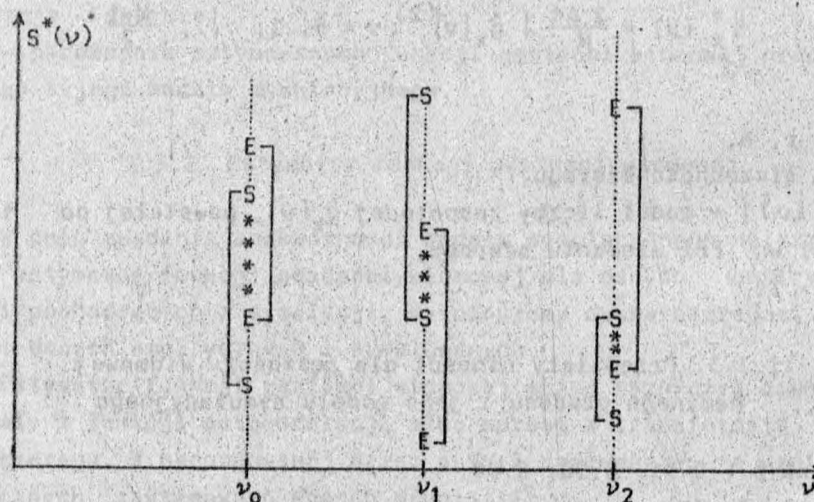
$x = r, s,$

$\alpha = 1 - p$  (przyjęty poziom istotności),

$\chi^2$  - wartość krytyczna statystyki chi-kwadrat o ustalonym poziomie istotności ( $\alpha/2$  lub  $1-\alpha/2$ ),

$S_x^*(\nu)$  - estymator funkcji gęstości widmowej procesu.

Przedziały ufności wyznaczamy tak dla gęstości widmowej badanego procesu, jak i jego modelu symulacyjnego. Model jest nieadekwatny wtedy i tylko wtedy, gdy przedziały ufności o krańcach obliczonych wg powyższych wzorów dla danych rzeczywistych i danych symulowanych nie mają żadnych punktów wspólnych (są rozłączne). W przypadku, gdy te przedziały nie są rozłączne nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o adekwatności modelu. Przypadek ten ilustruje rys. 2.



Rys. 2. Porównanie przedziałów ufności dla przebiegu rzeczywistego i symulowanego - model adekwatny

E, E - krańce przedziałów ufności dla danych empirycznych; S, S - krańce przedziałów ufności dla danych symulowanych; \*\*\* - wspólna część przedziałów ufności

## 2. Opis algorytmów programowych realizujących ocenę adekwatności modeli symulacyjnych

Ze względu na poznawczy i dydaktyczny charakter narzędzia pozwalającego badać adekwatność modeli symulacyjnych jego oprogramowanie należało oprzeć na języku spełniającym następujące wymagania:

- struktura i konstrukcja języka powinny nakłaniać do dobrego stylu programowania,
- klasa algorytmów dających się zapisywać w języku w sposób naturalny powinna być obszerna,
- opis języka powinien być precyzyjny, ale przy tym prosty,
- język powinien być łatwo i efektywnie implementowany na systemie mikrokomputerowym kompatybilnym z IBM PC/XT/AT.

Powyższe wymagania spełnia język programowania Turbo Pascal ver. 5.0.

### 2.1. Opis biblioteki procedur realizujących testy statystyczne i analizę widmową

W języku Turbo Pascal podstawą programowania modułowego są moduły (unit). Służą one przede wszystkim do grupowania procedur i funkcji w biblioteki, a także do dzielenia dużych programów na powiązane logicznie części. Moduł nie stanowi samodzielnego programu, a jego użycie w programie wymaga deklaracji. Po zadeklarowaniu modułu w danym programie dostępna jest każda procedura i funkcja zdefiniowana w module, jak również zadeklarowane w nim stałe, typy i zmienne. Uruchomienie skompilowanego programu zawierającego deklarację modułu wymaga, aby moduł taki był również wcześniej skompilowany.

W opisywanym systemie biblioteka procedur realizujących testy statystyczne i analizę widmową zawarta została w module pod nazwą "Walidacja". Poniżej został przedstawiony opis modułu wraz z zadeklarowanymi procedurami.

```
unit Walidacja  
{Deklaracja modułu  
interface  
const }
```

```

{Definicje stałych używanych w modelu }
type }
{Definicje typów wykorzystywanych w module }
{Nagłówki procedur zadeklarowanych w module: }
Procedure standary (m: integer; cs, ce: tmreal; var cs0, ce0: tmreal);
{Procedura sprowadza ciąg empiryczny i symulowany do ciągów loso-
wych z wartością oczekiwaną równą 0 }
{Opis parametrów: }
{m - liczebność ciągu }
{cs - ciąg symulowany }
{ce - ciąg empiryczny }
{cs0 - ciąg symulowany z wartością oczekiwaną równą 0 }
{ce0 - ciąg empiryczny z wartością oczekiwaną równą 0 }

procedure fft
(m: integer; ciagwe: tmreal; var fftre, fftim, modul: tmreal; tytul:
str.30;
{Procedura realizująca szybką transformację Fouriera }
{Opis parametrów: }
{m - liczebność transformowanego ciągu }
{ciagwe - ciąg wejściowy do transformacji }
{fftre - wektor części rzeczywistych liczb zespolonych powstałych
po transformacji ciągu wejściowego }
{fftim - wektor części urojonych liczb zespolonych powstałych po
transformacji ciągu wejściowego }
{modul - wektor modułów liczb zespolonych powstałych po transfor-
macji ciągu wejściowego }
{tytul - nazwa transformowanego wektora }

procedure awldmo
(m: integer; alfa, chk1, chk2: real; moduls, module: tmreal);
{Procedura realizująca: }
- obliczenie gęstości widmowych i krańców przedziałów ufności }
- porównanie przedziałów ufności: empirycznego i symulowanego }
{Opis parametrów: }
{m - liczebność prób }
{alfa - przyjęty poziom istotności }
{chk1 - wartość krytyczna statystyki chi-kwadrat o dwóch stopniach
swobody i poziomie istotności alfa/2 }

```

```
{chk2 - wartość krytyczna statystyki chi-kwadrat o dwóch stopniach  
swobody i poziomie istotności  $1 - \alpha/2$  }  
{moduls - ciąg modułów liczb zespolonych powstałych po FFT ciągu  
symulowanego }  
{module - ciąg modułów liczb zespolonych powstałych po FFT ciągu  
empirycznego }
```

procedure testnzal

```
{x, y: tmreal; lx, ly, r, s: integer; var tn: tablica};  
{TEST NIEZALEŻNOŚCI CHI-KWADRAT} }  
{Opis parametrów: }  
{x - ciąg o wartościach cechy x }  
{y - ciąg o wartościach cechy y }  
{lx - liczebność ciągu x }  
{ly - liczebność ciągu y }  
{r - liczba grup wartości w ciągu x }  
{s - liczba grup wartości w ciągu y }  
{tn - tablica niezależności } }
```

procedure oblwarst

```
{tn: tablica; r, s: integer; chk: real; var dec: boolean};  
{Obliczenie wartości statystyki chi-kwadrat }  
{Opis parametrów: }  
{tn - tablica niezależności }  
{r - liczba grup wartości w ciągu empirycznym }  
{s - liczba grup wartości w ciągu symulowanym }  
{chk - wartość krytyczna statystyki chi-kwadrat dla  $(r - 1)(s - 1)$   
stopni swobody dla przyjętego poziomu istotności }  
{dec - zmienna logiczna przyjmująca wartości:  
true - nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o niezależności bada-  
nych cech }  
false - niezależność badanych cech należy odrzucić }
```

procedure oblsrwar

```
{var xsr, sod: real; n: integer; ciąg: tmreal; napis: str. 30};  
{Procedura obliczająca średnią arytmetyczną i wariancję }  
{Opis parametrów: }  
{xsr - średnia arytmetyczna }  
{sod - wariancja } }
```

```

{n - liczebność ciągu }
{ciąg - ciąg wejściowy }
{napis - tekst informujący o rodzaju ciągu }

```

procedure testfsn

```

(var f: real; ls, lr: integer; ws, wr, fk: real; var dec: boolean);
{TEST F - S N E D E C O R A }
{Opis parametrów: }
{f - wartość obliczona statystyki }
{ls - liczebność ciągu symulowanego }
{lr - liczebność ciągu empirycznego }
{ws - wariancja w ciągu symulowanym }
{wr - wariancja w ciągu empirycznym }
{fk - wartość krytyczna statystyki }
{dec - zmienna logiczna przyjmująca wartości:
  true - wariancje są równe w obu ciągach
  false - wariancje w obu ciągach nie są równe }

```

procedure testst

```

(var t: real; ls, lr: integer; xr, xs, wr, ws, tk: real);
{TEST T - S T U D E N T A }
{Opis parametrów: }
{t - wartość obliczona statystyki }
{ls - liczebność ciągu symulowanego }
{lr - liczebność ciągu empirycznego }
{xr - średnia arytmetyczna w ciągu empirycznym }
{xs - średnia arytmetyczna w ciągu symulowanym }
{wr - wariancja w ciągu empirycznym }
{ws - wariancja w ciągu symulowanym }
{tk - wartość krytyczna dla testu t-Studenta }

```

procedure testwil

```

(var w: real; x, y: tmreal; wk, ew: real; ln, lm: integer);
{TEST W I L C O X O N A }
{Opis parametrów: }
{w - wartość obliczona statystyki }
{x - ciąg danych empirycznych }
{y - ciąg danych symulowanych }
{wk, ew - wartości krytyczne dla testu Wilcoxon }

```

```

{ln - liczebność ciągu empirycznego }
{lm - liczebność ciągu symulowanego }

procedure wykres (ile: integer; lke, lks, pke, pks: tnpreal);
{Procedura realizująca porównanie przedziałów ufności dla procesu
rzeczywistego i symulowanego - kreślenie wykresu }
{Opis parametrów: }
{ile - liczba przedziałów ufności przedstawionych na wykresie }
{lke - ciąg lewych krańców przedziałów ufności dla procesu empiry-
cznego }
{lks - ciąg lewych krańców przedziałów ufności dla procesu symulo-
wanego }
{pke - ciąg prawych krańców przedziałów ufności dla procesu empiry-
cznego }
{pks - ciąg prawych krańców przedziałów ufności dla procesu empiry-
cznego }
implementation
{Opis algorytmów dla poszczególnych procedur
end. }

```

## 2.2. Opis programu służącego do walidacji modeli symulacyjnych

Pakiet procedur służących do oceny adekwatności modeli symulacyjnych można eksploatować na każdym mikrokomputerze kompatybilnym z IBM PC/XT/AT w dowolnej konfiguracji (nie jest konieczne posiadanie dysku sztywnego). Program istnieje w wersji skompilowanej, nie trzeba więc być posiadaczem systemu Turbo Pascal 5.0. Pakiet wywołujemy z bieżącego urządzenia zewnętrznej pamięci dyskowej (na którym jest program) poprzez podanie nazwy pełnej OCENA.EXE lub nazwy skróconej (bez rozszerzenia - EXE) - OCENA.

Po wywołaniu programu pojawia się ekran z menu głównym pakietu oceny adekwatności modelu symulacyjnego. Użytkownik ma do wyboru trzy metody badania zgodności modelu z systemem rzeczywistym:

- 1 - analiza widmowa w przypadku korelacji między badanymi zmiennymi losowymi,
- 2 - sprawdzenie niezależności zmiennych losowych opisujących populację rzeczywistą i symulowaną,

3 - statystyczne testy parametryczne i nieparametryczne w przypadku niezależności zmiennych losowych.

Czwartą opcją, jaką ma do dyspozycji użytkownik jest wyjście z programu i powrót do systemu operacyjnego. Gdy wybrana zostanie którakolwiek z opcji (1-3) pojawia się ekran służący do wprowadzania danych dla programu. Należy wprowadzić następujące dane:

- liczebność wprowadzanych ciągów symulowanych i empirycznych (LSYM i LEMP), w przypadku badania adekwatności metodą analizy widmowej liczebności ciągów muszą być potęgą liczby 2 - np. 1, 2, 4, 8, 16, ...;

- ciągi danych rzeczywistych i symulowanych,

- poziom istotności, na jakim ma być przeprowadzona analiza statystyczna ( $\alpha$ ),

- wartość krytyczną dla testu chi-kwadrat odczytaną z tablic statystycznych dla  $(r - 1)(s - 1)$  stopni swobody i przyjętego poziomu istotności  $\alpha$  ( $r, s$  - liczba grup wartości w ciągach danych rzeczywistych i symulowanych),

- wartość krytyczną testu F-Snedecora odczytaną z tablic statystycznych dla LEMP-1 i LSYM-1 stopni swobody i przyjętego poziomu istotności,

- wartość krytyczną dla testu t-Studenta odczytaną z tablic statystycznych dla LSYM + LEMP - 2 stopni swobody i przyjętego poziomu istotności  $\alpha$ ,

- dwie wartości krytyczne dla testu Wilcoxon [tzw. wartość  $W_\alpha$  i  $E(W)$ ] odczytane z tablic statystycznych dla przyjętego poziomu istotności oraz wczytanych wartości LEMP i LSYM,

- dwie wartości krytyczne dla testu chi-kwadrat odczytane z tablic statystycznych dla dwóch stopni swobody i  $\alpha/2$  oraz  $1 - \alpha/2$  poziomu istotności.

Po wprowadzeniu danych następuje wykonanie części obliczeniowej programu wg zaproponowanej metody. O przebiegu realizacji zadania użytkownik informowany jest poprzez zestaw ekranów. Nazwa wykonywanego aktualnie fragmentu procedury badania adekwatności modelu symulacyjnego pojawia się na podświetlonym tle. Dla testów statystycznych wypisywane są następujące informacje:

- treść hipotezy "zerowej" i alternatywnej,

- wartość obliczona i krytyczna statystyki,

- raport z przebiegu obliczania wartości statystyki (dla testów: niezależności chi-kwadrat i Wilcoxona),
- decyzja o braku podstaw do odrzucenia hipotezy "zerowej" bądź o odrzuceniu hipotezy "zerowej".

Testy parametryczne poprzedzone są informacjami o wartościach podstawowych charakterystyk badanych prób (wartość oczekiwana i wariancja).

W przypadku analizy widmowej na ekranach pojawiają się:

- wystandaryzowane ciągi danych wejściowych,
- przebieg obliczeń i wyniki szybkiej transformacji Fouriera dla wystandaryzowanych ciągów wejściowych,
- wyznaczone wartości estymatorów funkcji gęstości widmowej dla procesu rzeczywistego i jego modelu symulacyjnego,
- wyliczone krańce przedziałów ufności dla obu procesów oraz ich porównanie w formie tabelarycznej.

Po wykonaniu obliczeń następuje powrót do menu głównego programu.

Poniżej zostały przedstawione wybrane fragmenty programu obrazujące strukturę przepływu sterowania w procesie walidacji modelu symulacyjnego.

```
{R-} {Range checking off}
{B-} {Boolean short circuiting off}
{S+} {Stack checking on}
{I+} {I/O checking on}
{N-} {No numeric coprocessor}
{$m 65 500, 16 384, 655 360}
program ocena - adekwatności;
uses Crt, Graph, Walidacja;
const
  {Definicja stałych użytych w programie}
type
  {Definicja typów wykorzystywanych w programie}
var
  {Deklaracje zmiennych}
  {(1) Liczebności ciągów}
  lemp, lsym, m: integer;
  {(2) Wartości krytyczne i obliczone statystyk}
  alfa, chk1, chk2, chk, tk, fk, wk, ew, t, f, xr, xs, wr, ws, w: real;
```

```

{(3) Ciągi wejściowe do porównania}
comp, csym: tmreal;
{(4) Ciągi poddane transformacjom}
comp0, csym0, fftree, fftime, fftres, fftims, module, moduls:
  tmreal;
{(5) Zmienna sterująca wyborem procedur do realizacji z poziomu me-
  nu}
decyzja: char;
{(6) Tablica niezależności dla testu niezależności chi-kwadrat} tn:
  tablica;
{(7) Zmienne logiczne}
decwar, decnzal, koniec, aw, tnp, tnz: boolean;
{Deklaracje procedur}
procedure testy;
begin
  if m < 30 then testwil (w, comp, csym, wk, ew, lemp, lsym)
  else
    begin
      oblsrwar (xr, wr, lemp, comp, 'empirycznego');
      oblsrwar (xs, ws, lsym, csym, 'symulowanego');
      testfsn (f, lsym, lemp, ws, wr, fk, decwar);
      if decwar then testst (t, lsym, lemp, xr, xs, wr, ws, tk);
    end;
  end;
procedure spektrum;
begin
  standary (m, csym, comp, csym0, comp0);
  fft (m, comp0, fftree, fftime, module, 'empirycznego');
  fft (m, csym0, fftres, fftims, moduls, 'symulowanego');
  awidmo (m, alfa, chk1, chk2, moduls, module);
end;
BEGIN {Program główny}
  koniec = false;
  repeat
    tnz = false;
    aw = false;
    tnp = false;
    repeat

```

```

{Wywołanie procedury obsługi ekranu menu programu}
Write('Wybierz (1/2/3/0)');
decyzja: = ReadKey;
case decyzja of
  '1' : {analiza widmowa} aw: = true;
  '2' : {test niezależności, analiza widmowa, testy}
        tnz: = true;
  '3' : {testy} tnp: = true;
  '0' : {wyjście z programu} halt (0);
  else begin end
end
until decyzja in ['0' '1', '2', '3'];
{WPROWADZANIE DANYCH DO PROGRAMU}
{Wywołanie procedury realizującej wprowadzenie:}
{1 - liczebności ciągów (lemp, lsym),}
Read (lemp, lsym);
if aw or tnz then
  {Sprawdzenie, czy liczebność ciągu jest potęgą liczby 2}
  {2 - ciągu empirycznego (cemp) i symulowanego (csym)}
  {3 - wartości krytycznych statystyk}
  Read (alfa);
  if tnz then Read (chk);
  if tnp or tnz then Read (fk, tk, w, ew);
  if tnz or aw then Read (chk1, chk2);
{WYBÓR PROCEDUR DO REALIZACJI}
if lemp < lsym then m: = lsym else m: = lemp;
case decyzja of
  '1': spektrum;
  '2': begin
        testnzal (cemp, csym, lemp, lsym, 2, 2, tn);
        oblwarst (tn, 2, 2, chk, decnzal);
        if decnzal then testy else spektrum;
      end;
  '3': testy;
end;
until koniec;
END.

```

### Podsumowanie

Celem artykułu była prezentacja zaproponowanej przez autora procedury badania adekwatności modeli symulacyjnych. Została ona opracowana w ramach problemu badawczego KRP XI nt. "Instrumenty zarządzania gospodarką" na Wydziale Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego w roku 1988. Przedstawiona procedura badania adekwatności modeli symulacyjnych jest całkowicie oryginalna. Obejmuje ona metody ilościowe, uniwersalne dla oceny zasadności modeli symulujących procesy dyskretne o charakterze losowym.

Cała procedura została zaimplementowana na mikrokomputerze kompatybilnym z IBM PC XT\AT w języku programowania Turbo Pascal 5.0. Powstały pakiet programowy wykorzystywany jest praktycznie w Katedrze Informatyki UŁ i na Wydziale Zarządzania UW do oceny adekwatności modeli symulacyjnych procesów dyskretnych o charakterze losowym.

Przewidywane kierunki dalszych badań:

- prace nad rozciągnięciem obszaru stosowalności opracowanej przez autora procedury badania adekwatności, tak aby można ją było zastosować do modeli procesów ciągłych,
- stworzenie i oprogramowanie pakietu procedur analizy wielokryterialnej, służącego do badania użyteczności modelu symulacyjnego dowolnej klasy.

### Literatura

- [1] D o m a ń s k i C., Statystyczne testy nieparametryczne, PWE, Warszawa 1979.
- [2] F i s h m a n G. S., Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody, PWE, Warszawa 1981.
- [3] K e n d a l l M. G., S t u a r t A. G., The Advanced Theory of Statistics, Hafner, London 1961.
- [4] M a l l o z z i J. S., Turbo Pascal for Program Design, McGraw-Hill, Inc., N. Y. 1988.

- [5] Martin F. F., Wstęp do modelowania cyfrowego, PWN, Warszawa 1976.
- [6] Mokros T., Ocena adekwatności modeli symulacyjnych, praca przygotowana w ramach tematu badawczego KRP XI nt. "Instrumenty zarządzania gospodarką", Uniwersytet Warszawski, Warszawa 1988, praca nie publikowana.
- [7] Naylor T. H., Modelowanie cyfrowe systemów ekonomicznych, PWN, Warszawa 1975.
- [8] Niderliński A., Systemy cyfrowe automatyki przemysłowej, WNT, Warszawa 1977.
- [9] Perkowski P., Techniki symulacji cyfrowej, WNT, Warszawa 1980.
- [10] Structured Analysis and System Specification - Tom De Marco, Yourdon, Inc., N. Y. 1978.
- [11] Swiecznikow A. A., Podstawowe metody funkcji losowych PWN, Warszawa 1975.

Tomasz Mokros

#### EVALUATION OF ADEQUACY OF SIMULATION MODELS

The main problem encountered while conducting simulation experiments is referring an accepted model and results obtained by means of it to a simulated fragment of reality. All the problems appearing here are called an evaluation of usefulness or an evaluation of adequacy of simulation models. This stage decides to what extent conclusions concerning a model can be transferred onto an analyzed system, i.e. to what extent a model is adequate in relation to a modelled reality. It is an important and at the same time a difficult problem connected with computer simulation.

At the stage of evaluating a model's usefulness it is necessary to construct a tool allowing to compare a model with an object it reflects. The author has presented a procedure of analyzing the adequacy of simulation models with application of statistical tests and spectrum analysis. This procedure is universal, as it makes allowances for the main problems, which can be encountered while evaluating usefulness of a model (i.e. whether there is or not an autocorrelation between subsequent results of an experiment and a different size of analyzed samples). Consequently, it can be applied to all classes of simulation models. The algorithm of the model's validation was implemented on the microcomputer of IBM PC class in an integrated environment of Turbo Pascal 5.0 language.

The article consists of two parts. Its first part ("Evaluation of adequacy of simulation models by means of statistical tests and spectrum analysis") describes the procedure of analyzing the usefulness of a model proposed by the author by means of statistical tests and spectrum analysis. The second part ("Description of programme algorithms implementing an evaluation of adequacy of simulation models") presents programme algorithms used for statistical tests and spectrum analysis.